

平成 29 年度(2017 年度) 学位論文(修士)

遅延予測を用いたスケジューリングによる
到着管理の効率改善

平成 30 (2018 年) 2 月 22 日

首都大学東京大学院

システムデザイン研究科 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

学修番号 16891523

氏名 下村 顕秀

指導教員名 武市 昇

目次

1. 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
2. 到着管理のシミュレーション.....	4
2.1 航空機の実運航データ.....	4
2.2 気象モデル.....	4
2.3 航空機の力学モデル.....	4
2.4 燃料消費量の推定式.....	5
2.5 想定する交通流.....	6
2.6 飛行経路の計算.....	7
2.7 運航コストの導入.....	8
3. 到着管理におけるスケジューリング.....	9
3.1 交通流管理の安全性.....	9
3.2 基本方式によるスケジューリング.....	10
3.3 遅延予測方式によるスケジューリング.....	11
4. 各スケジューリング方式の評価.....	15
4.1 参考交通流.....	15
4.2 各スケジューリング方式の評価.....	16
4.3 スケジューリングを行う時刻の制約条件の影響.....	24
4.4 遅延予測方式と参考交通流との比較.....	30
5. 結論.....	33
参考文献.....	34
謝辞.....	35

第1章 序論

1. 1 研究背景

将来の航空交通需要の増大に対応するため、時間管理を用いた航空交通管理が計画されている¹⁻³。その一つに、図1のように航空機の巡航状態から降下を経て合流地点に到着し、空港の滑走路に着陸するまでの到着管理における時間基準の間隔確保が挙げられる^{4,5}。この管理手法において、管制官は各航空機の合流地点における到着時刻を指定し、航空機はその経路や速度を変更することにより降下所要時間を調整し、指定された時刻で合流地点に到着する。この時、航空機は降下及び進入の各段階において水平飛行を行うことなくエンジン推力をほぼ最小に保ったまま降下を継続する。このような航空機の運用方式を継続降下運用(CDO : Continuous Descent Operation, 以下CDOとする)と呼ぶ。このCDOによる到着管理においては、合流地点で航空機間に一定以上の時間間隔を確保することで安全を確保し、なおかつ交通流全体としての運航コストを最小化するような各航空機の到着時刻を決定するスケジューリングが必要となり、これまでに様々なスケジューリング方法が提案されてきた。

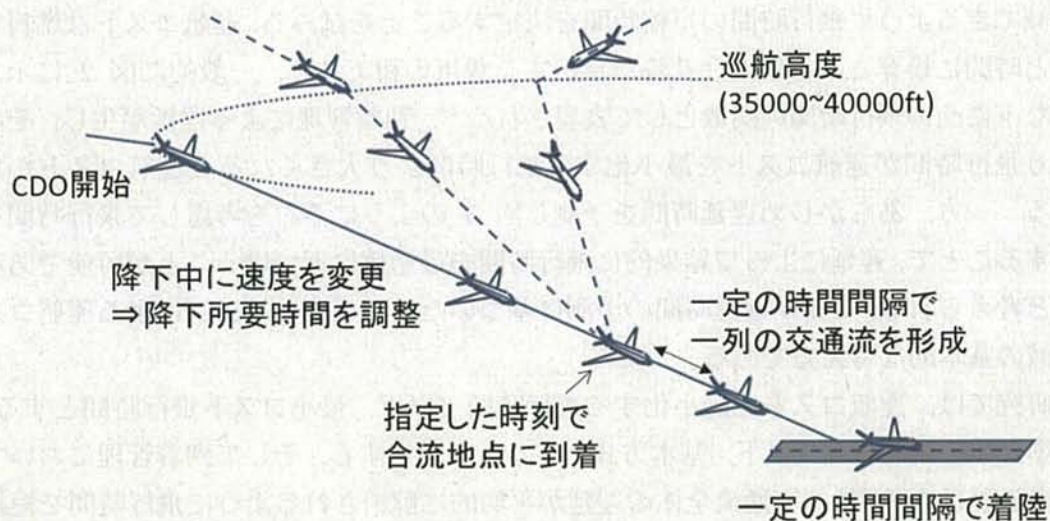


図1 基本的な到着管理の概念

遅延による時間間隔の確保が原則的な手法として提案されている一方、飛行時間の短縮により遅延の蓄積を抑制して運航コストを低減できる可能性についても言及されている⁴。その後、飛行時間の短縮が交通流の振る舞いや運航コストの低減に与える効果が研究されて来た⁶⁻⁹。これらの研究では、飛行時間の最適な短縮時間を求めるために、航空機の運航コストの関数^{7,8} 或いはそれを推定するための様々なパラメータを用いていた⁹。しかし、地上の管制官は通常は航空機の重量に関する情報や、運航コストを決定する係数の値を知ることができないため、運航コストの関数等の情報を用いることができない。

一方、将来の四次元運航においては、航空機上で予測される予測到着時刻と最短到着時刻などの時刻の情報を地上の管制官に通知するようになることが想定されている¹⁰。また、最高密度の理想的な交通流において、予測到着時刻のみの情報から遅延時間を予測しそれを交通流全体で平均的に解消するように飛行時間を短縮することも提案されている¹¹。

1. 2 研究目的

そこで本研究では、これらの予測到着時刻と最短到着時刻の情報のみから運航コストを低減できるように飛行時間の短縮時間を決定することを試みる。運航コストは燃料消費量と時間に換算される航空会社等が負担する費用の和であり、一般的に図 2 に示すような下に凸の飛行時間の関数として表現される¹²。到着管理による遅延が生じ、それにより飛行時間が運航コストを最小化する飛行時間より大きくなると運航コストが増加する。一方、あらかじめ遅延時間を予測し図 3 のようにそれを考慮して飛行時間を設定することで、遅延によって結果的に飛行時間を最適値に近づけることが可能であるものと考えられる。これが遅延時間の予測に基づいたスケジューリングによる運航コスト低減の基本的な考え方である。

本研究では、運航コストを最小化する飛行時間（以下、最小コスト飛行時間とする）を基準とする到着管理（以下、基本方式とする）を想定する。そして到着管理において生じ得る遅延を予測し、交通流全体の遅延が平均的に解消されるように飛行時間を短縮するスケジューリング（以下、遅延予測方式とする）を行う。この遅延予測方式の有効性を、国土交通省航空局から提供された実運航データ¹³を用い、特に西方面から羽田空港へと飛行する航空機を対象とした到着管理シミュレーションにより明らかにする。

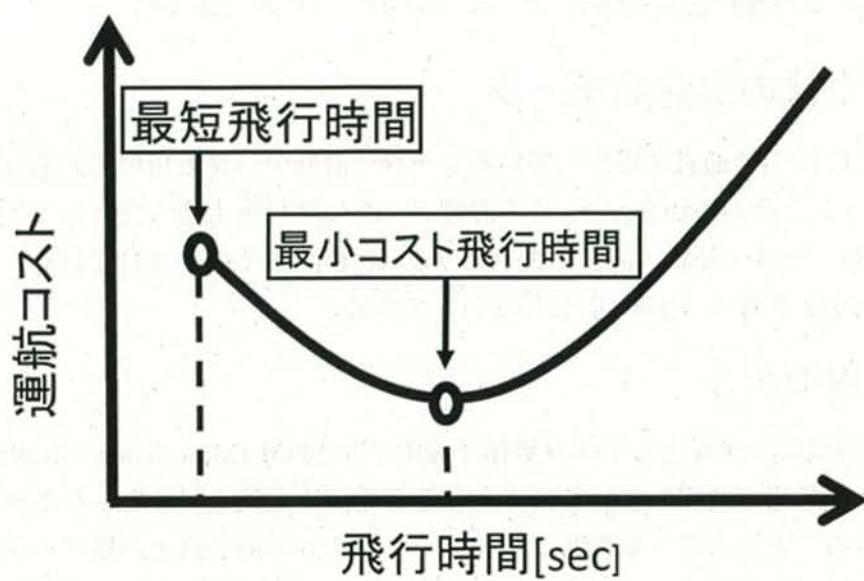


図 2 運航コストと飛行時間の関係図

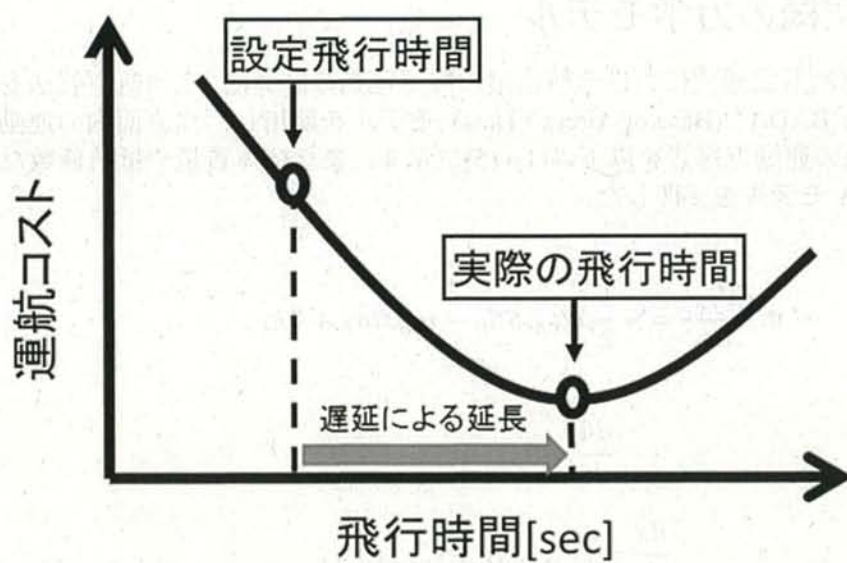


図 3 遅延予測による運航コストの低減

第2章 到着管理のシミュレーション

2. 1 航空機の実運航データ

本研究では、国土交通省が提供しているレーダー計測データを用いて到着交通流のシミュレーションとその評価を行う。この計測データには日本上空を飛行していた航空機の情報（時刻・緯度・経度・高度・型式）が約 10 秒間隔で格納されている。またデータの日付は 2012 年度の一部期間（計 42 日）である。

2. 2 気象モデル

本研究では気象モデルとしてメソ数値予報モデル MSM (Meso Scale Model) を使用する。MSM¹⁴ は気象庁が公開している日本及びその近海の大気を対象としたモデルである。MSM を用いることにより 3 時間毎・経緯度 0.1 度間隔の格子点上の風データを得ることができる。本研究では、このデータに線形補間を用いることで任意の位置・時刻における風データを抽出する。

2. 3 航空機の力学モデル

本研究では到着交通流における航空機の降下運動の計算に、欧州航空航法安全機構が提供している BADA¹⁵ (Base of Aircraft Data) モデルを使用し、垂直面内の運動のみを扱った。航空機の運動方程式を以下の(1)~(5)に示す。また機体質量や抵抗係数などの機体諸元は BADA モデルを参照した。

$$m \frac{dV_{TAS}}{dt} = -\frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_D - mg \sin \gamma + Thr \quad (1)$$

$$\frac{dh}{dt} = V_{TAS} \sin \gamma \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_{TAS} \cos \gamma + V_{wind} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2mg \cos \gamma}{\rho V_{TAS}^2 S} \quad (4)$$

$$C_D = C_{D0} + C_{D2} C_L^2 \quad (5)$$

Thr	:推力	D	:抗力
V_{TAS}	:真大気速度	g	:重力加速度
m	:機体質量	h	:高度
ρ	:空気密度	S	:翼面積
C_D	:抵抗係数	C_{D0}	:有害抵抗係数
C_{D2}	:誘導抵抗係数	C_L	:揚力係数
γ	:経路角	V_{wind}	:進行方向の風

2. 4 燃料消費量の推定式

BADA モデルにおいて、ノミナル状態の燃料流量 f_{nom} は推力Thrと燃料流量係数 η の積として与えられる。係数 η は1キロニュートンあたりの燃料消費量であり、真対気速度の関数で表される。

$$f_{nom} = \eta \times Thr \quad (6)$$

$$\eta = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right) \quad (7)$$

また巡航時の燃料流量 f_{cr} はノミナル状態の燃料流量 f_{nom} に係数 C_{fcr} を乗じることで求められる。

$$f_{cr} = f_{nom} \times C_{fcr} \quad (8)$$

最小燃料流量 f_{min} はエンジンアイドリング時の燃料流量であり、高度の関数として与えられる。

$$f_{min} = C_{f3} \times \left(1 - \frac{H}{C_{f4}}\right) \quad (9)$$

上昇・巡航状態における燃料流量はそれぞれ f_{nom} 、 f_{cr} で与えられ、降下時の燃料流量 $f_{ap/ld}$ は式(10)のように与えられる。

$$f_{ap/ld} = \max(f_{nom}, f_{min}) \quad (10)$$

2. 5 想定する交通流

本研究では、日本で最も交通量の多い西方面から羽田空港の滑走路へと向かう航空機を対象としてシミュレーションを行う。図 4 はある 1 日の西方面から羽田空港へ向かう航空機の飛行軌跡を表した図である。想定する交通流は実際の航空管制で扱われているウェイポイント ADDUM を合流地点として、この合流地点から 250km 離れた地点から CDO を開始し合流地点に高度 1 万フィートで到着するものとする。ただし、合流地点から 250km 離れた地点において航空機が上昇段階の場合は、巡航開始地点を CDO 開始地点とする。また合流地点では先行機との到着時間間隔を 120 秒以上保つものとする。図 4 の黒線は巡航段階、赤色の線は到着管理による飛行段階の航空機の飛行軌跡を表している。

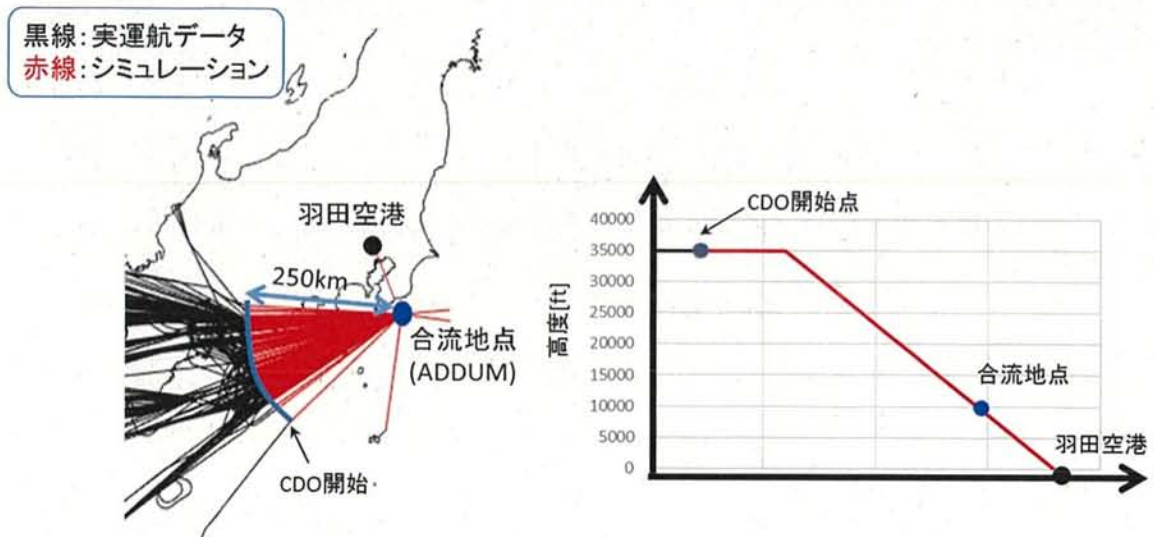


図 4 ある 1 日の到着交通流における航空機の飛行軌跡

2. 6 飛行経路の計算

本研究では、実運航データに図 5 のような CDO 飛行経路を導入する。図の縦軸は航空機の高度[ft]、横軸は CDO 開始地点からの飛行距離[km]を表している。水平飛行距離 x 、水平飛行および降下する際の指示大気速度(IAS)である $V_{IAS, 1}$ 、 $V_{IAS, 2}$ を変化させ、各々の経路での飛行時間と燃料消費量を求める。ただし、 $V_{IAS, 1}$ と $V_{IAS, 2}$ は 230~290[knot]の範囲で変化させる。 x 、 $V_{IAS, 1}$ 、 $V_{IAS, 2}$ の 3 つのパラメータを変化させると各飛行時間での最小の燃料消費量が一意に定まり、各飛行時間に対する最適な燃料消費量が求まる。こうして各飛行時間に対して最小燃料消費量を得る飛行経路と図 6 のような横軸を飛行時間、縦軸を各飛行時間での最小燃料消費量とした下に凸な最小燃料曲線を求めた。

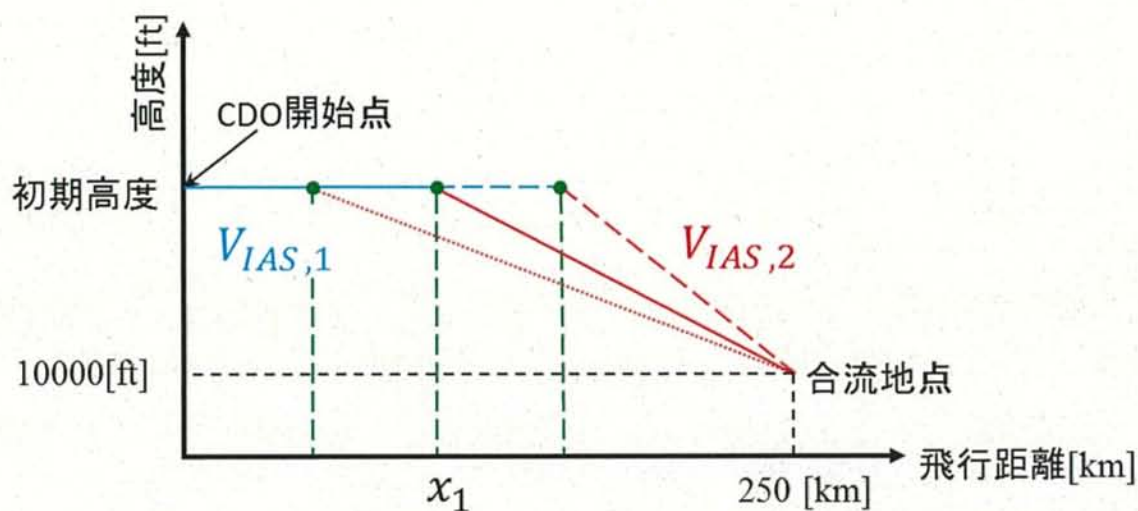


図 5 CDO 飛行経路

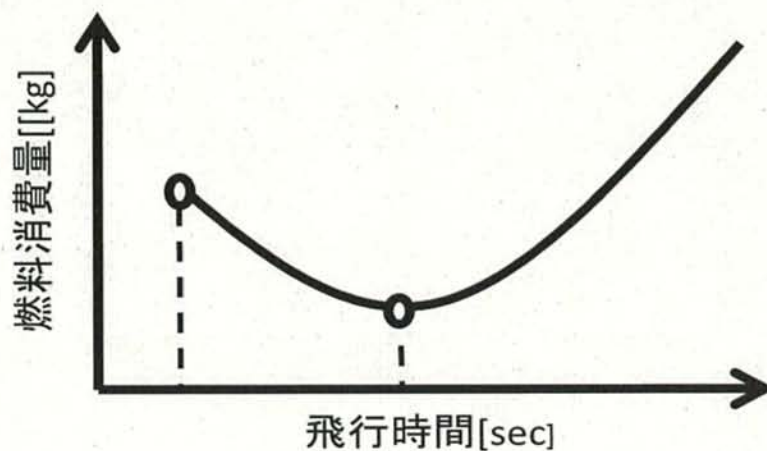


図 6 最小燃料曲線

2. 7 運航コストの導入

本研究では、航空機の運航コストを C 、各航空機の飛行時間を T_{flight} 、図 6 の最小燃料曲線において燃料消費量が最小となる飛行時間を T_{ref} 、燃料消費量を W_{fuel} として式 (11)のように運航コストを定める。

$$C = \alpha(T_{flight} - T_{ref}) + W_{fuel} \quad (11)$$

この式の第 1 項は時間で換算される航空会社等が負担する費用である。ここで α は燃料消費量と飛行時間の比を表した定数であり、 α の値を変化させることで燃料消費量と飛行時間の等価関係を決める事ができる。例えば $\alpha=0.5$ のときは、2[sec]の飛行時間が 1[kg]の燃料消費量と等価となる。本研究では定数 α を時間係数とし、シミュレーションにおいては全航空機の時間係数を $\alpha=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ とした 5 つの場合を考慮する。

第3章 到着管理におけるスケジューリング

3.1 交通流管理の安全性

管制官はパイロットから通知された予測到着時間に基づいて合流地点の到着順を決定する。到着順を決定した後は、合流地点において前後の航空機同士が安全な到着時間間隔を確保できるように飛行時間の調整を行う。本研究ではこの安全な時間間隔を120秒とする。次に管制官は指定した飛行時間で飛行するようパイロットに指示をする。この一連の手順を図7に示す。この時、交通流全体として運航コストを最小化させつつ合流地点における到着時間間隔を常に安全な間隔で確保するようなスケジューリング方式が必要である。

本研究では研究目的で述べたように次の2つのスケジューリング方式を考える。1つは本研究で想定する到着管理のスケジューリング方式である基本方式とする。2つ目は今回提案する遅延予測を利用したスケジューリング方式である遅延予測方式である。ただし、通知される予測到着時刻が最小コスト飛行時間で飛行した際の到着時刻と一致していることを前提とする。

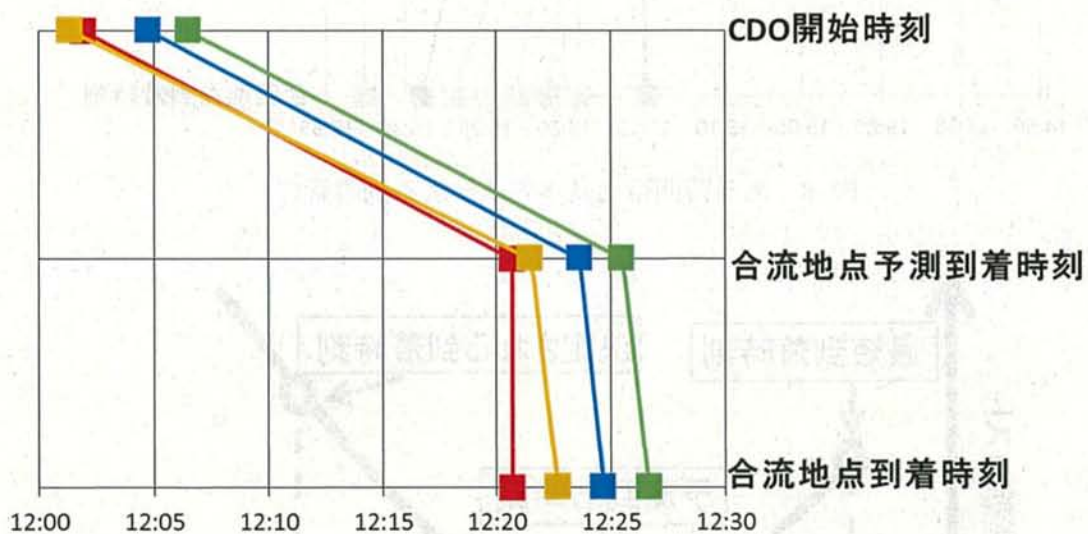


図7 想定する到着管理のスケジューリング

3. 2 基本方式によるスケジューリング

この方式では、合流地点の到着時刻をパイロットから通知される予測到着時刻に基づいて予測する。この時、合流地点において先行機との時間間隔が安全な時間間隔を確保できる場合は予測到着時刻に到着させる。ただし、予測到着時刻に到着すると合流地点での先行機との時間間隔が安全な時間間隔を下回る場合は、その時間間隔が安全な時間間隔となるように飛行時間を延長する。図 8 はある 1 日のある時間帯における基本方式による到着管理のスケジューリングを表した図である。この方式では、先行機との間隔のみを考慮するので、図 9 のように混雑時間帯にある航空機に遅延が発生すると、その後続の航空機は飛行時間の延長を強いられ遅延が後方へと蓄積してしまい、交通流全体として慢性的な遅延が発生する。そのため、図 9 に示されるように予測到着時刻から延長される分だけ運航コストが増加してしまう。

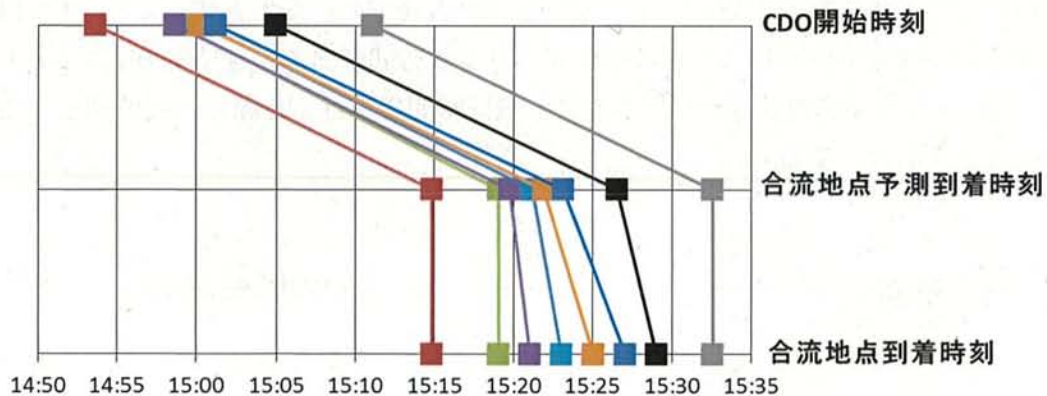


図 8 ある時間帯の基本方式による到着管理

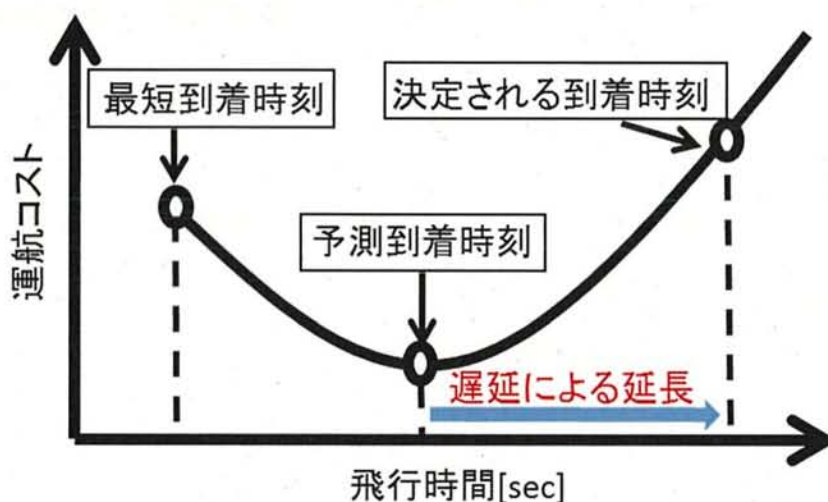


図 9 遅延による運航コストの増加

3. 3 遅延予測方式によるスケジューリング

本研究で提案するこの方式では、まず管制官は予測到着時刻から合流地点における局所的な混雑交通流を予測し、その混雑交通流に遅延予測方式のスケジューリングを適用する。局所的な混雑交通流の予測方法は次のように行う。図 10 は図 8 と同じ時間帯の交通流であり、基本方式によるスケジューリングを表した図である。図に示すように基本方式での合流地点到着時刻において、ある連続した 2 機に着目してその間の到着間隔が安全な時間間隔を下回る場合、前方の航空機を始点として混雑交通流が始まるものとする。そして、その 2 機よりも後方の航空機に着目していき、ある航空機とその後方との到着間隔が安全な時間間隔を上回る場合、混雑交通流は終了するものとする。図 10 では赤丸に囲まれた 6 機の航空機が混雑交通流に含まれる航空機である。次にこの局所的な混雑交通流において、各航空機の最小コスト飛行時間との時間差である遅延時間を求め、更に混雑交通流に含まれる全航空機の遅延時間の平均値を求め、その値を局所的な混雑交通流における遅延予測値とする。例えば、図 10 において合流地点予測到着時刻順に並んでいる航空機に 1 から 8 までの番号を順番に振っていく。表 1 は基本方式での合流地点到着時刻における各航空機の遅延時間を示した表である。表 1 において、図 10 の局所的な混雑交通流に含まれる航空機は 2 番から 7 番までの航空機である。この混雑交通流における遅延時間の予測値は、2 番から 7 番の航空機の遅延時間の平均となる。そして図 10 のように予測した局所的な混雑交通流に遅延予測方式のスケジューリングを適用する。ただし、図の 1 番目と 8 番目の航空機のように混雑交通流に含まれない航空機には遅延予測方式のスケジューリングは適用せずに、飛行時間の調整を行わないまま合流地点予測到着時刻をそのまま合流地点到着時刻としてパイロットに通知する。

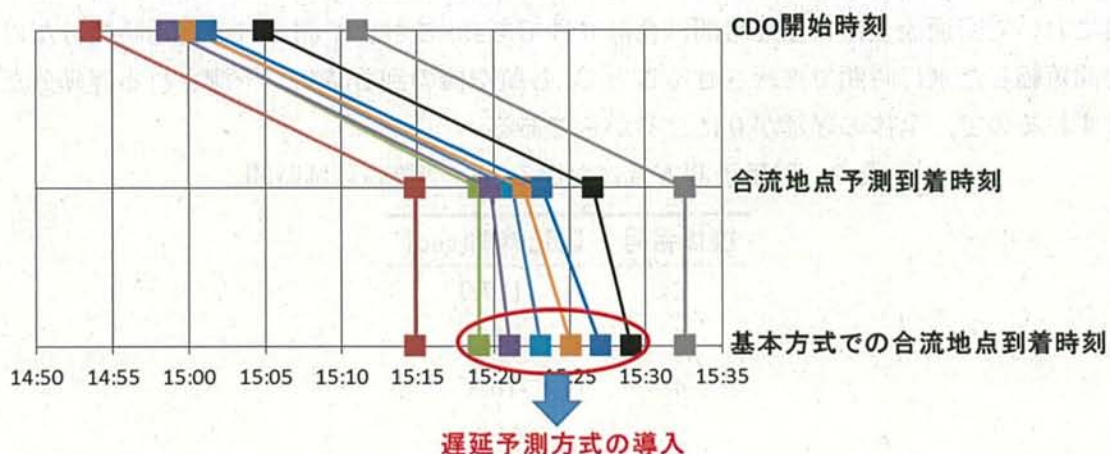


図 10 局所的な混雑交通流における遅延予測方式の導入

表 1 基本方式における各航空機の遅延時間

機体番号	遅延時間[sec]
2	0.0
3	78.6
4	110.7
5	188.2
6	234.7
7	150.0

遅延予測方式の導入において、管制官は先程求めた遅延予測値を用いて遅延予測方式における各航空機の設定飛行時間を決定する。管制官が局所的な混雑交通流における各航空機に設定する飛行時間を T_{config} 、最小コスト飛行時間を T_{opt} 、予測した遅延時間を T_{delay} 、最短飛行時間を T_{min} として、次の(12)式の様に定義する。まず、最小コスト飛行時間から遅延予測値 T_{delay} 分だけ短縮した時間を設定し、その設定した飛行時間が最短飛行時間 T_{min} を下回る場合は設定飛行時間を最短飛行時間 T_{min} とする。ただし、設定飛行時間で飛行した時に先行機との到着間隔が 120 秒未満になる場合は、120 秒以上の間隔を確保できるように設定飛行時間を延長して飛行させる。

$$T_{config} = \begin{cases} T_{opt} - T_{delay} & (T_{config} \geq T_{min}) \\ T_{min} & (T_{opt} - T_{delay} < T_{min}) \end{cases} \quad (12)$$

そして基本方式と同様に、航空機ごとに決められた設定飛行時間から合流地点到着時刻を再度予測し、合流地点で先行機との時間間隔が 120 秒以上となるように飛行時間の調整を行う。次の表 2 は遅延予測方式における各航空機の遅延時間を表した表である。表において交通流全体の遅延時間は合計 0 秒であり、これは予測される遅延時間分だけ時間短縮した飛行時間で飛行させることで、各航空機の到着時刻が予測される遅延分だけずれるので、全体の遅延が 0 になるからである。

表 2 遅延予測方式における各航空機の遅延時間

機体番号	遅延時間[sec]
2	-127.0
3	-48.5
4	-16.3
5	61.1
6	107.7
7	23.0

次に図 10での交通流における基本方式と遅延予測方式のスケジューリングによる航空機の燃料消費量と運航コストを比較する。下の表 3 は基本方式での燃料消費量と運航コストを、表 4 は遅延予測方式での燃料消費量と運航コストを表している。この交通流における運航コストについては、各航空機の時間係数 $\alpha = 0.25$ として計算している。表 2 をみると、混雑交通流の先頭の航空機の飛行時間が大きく短縮しており、最小コストとなる到着時刻よりも早い時刻で到着するので、遅延予測方式の方が基本方式よりも運航コストが大きくなってしまっている。しかし、図 3 のように後続の航空機群は短縮した飛行時間で飛行する際に、遅延による飛行時間の延長によって結果的に最小コストとなる飛行時間に近づくので運航コストも最小値に近づき、後続の航空機は遅延時間が小さくなり運航コストも小さくなっている。

表 3 基本方式での燃料消費量と運航コスト

機体番号	燃料消費量[kg]	運航コスト
2	442.3	435.9
3	620.0	620.0
4	504.9	511.4
5	1295.3	1331.2
6	635.4	694.0
7	299.0	326.4
合計	3796.9	3918.9
平均	632.8	653.2

表 4 遅延予測方式での燃料消費量と運航コスト

機体番号	燃料消費量[kg]	運航コスト
2	559.1	521.0
3	646.8	615.1
4	487.3	462.2
5	1228.2	1232.4
6	487.8	514.7
7	236.9	232.6
合計	3646.1	3578.0
平均	607.7	596.3

また図 11 のように赤丸で囲まれた混雑交通流の先頭の黒色の航空機が時間短縮する際に、その前方の緑色の航空機との間で 120 秒以上の時間間隔を確保できないような場合、緑色の航空機も含めてスケジューリングを再び行い、緑色の航空機も時間短縮することで 120 秒の時間間隔を確保する。また、緑色の航空機が水色の航空機との間でも時間間隔を確保できないような場合も同様に先行する水色の航空機も含めた再スケジューリングを行い、水色の航空機も時間短縮させることで、航空機間の時間間隔を確保する。水色の航空機よりも先行する航空機群についても同様に再スケジューリングを行う。ただし、交通流管理の実運用を考慮して混雑交通流の先頭の黒色の航空機よりも先行する航空機群を含めたスケジューリングをする時刻は、黒色の航空機が ADDUM よりも 250km 離れた地点に到着する時刻つまり CDO を開始する時刻よりも X 分前とし、本研究ではこの X を $X=0, 5, 10, 20, 30, \infty$ (分)を想定する。この時、紫色の航空機以外の航空機はスケジューリングを行う時刻において、まだ CDO を開始していないので再スケジューリングによる時間短縮を行うことが可能である。逆に紫色の航空機はスケジューリングをする時刻によりも前にすでに CDO を開始しているので再スケジューリングによる時間短縮は不可能である。

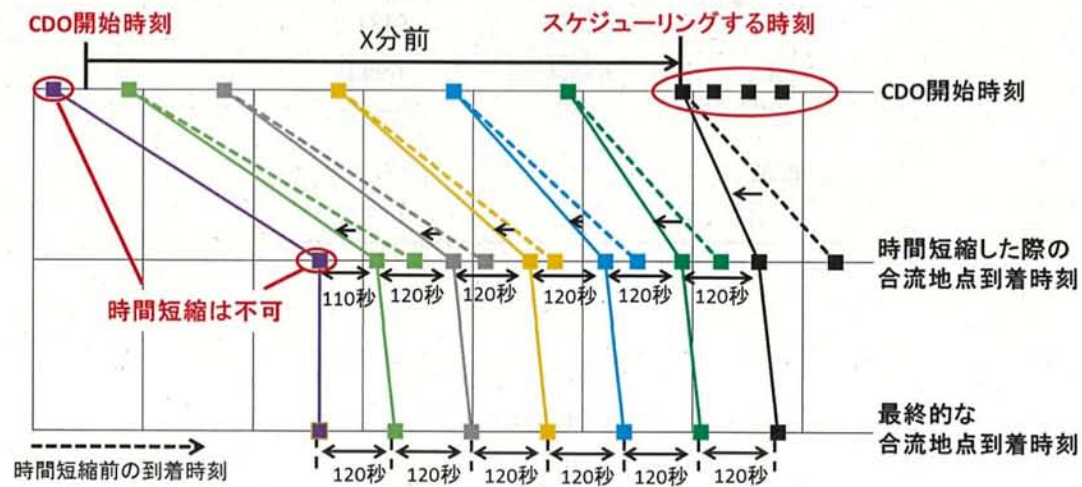


図 11 再スケジューリング

第4章 各スケジューリング方式の評価

4.1 参考交通流

第3章で述べた基本方式と遅延予測方式の2通りの到着管理におけるスケジューリング方式を評価するにあたって、参考値として全航空機が合流地点において前後間で最小限の時間間隔を確保しつつ、交通流全体の運航コストが最小となるような最適な飛行時間で飛行する交通流である参考交通流での運航コストを計算した。

この参考交通流における運航コストを求めることは、運航コストを最小化するように交通流全ての航空機の飛行時間の最適化を行うことと同じである¹⁶⁻¹⁸。例えば、交通流におけるある連続した3機の航空機について考えると、図12に示すように3本の運航コスト関数が存在する。この時、3機の航空機に対して合流地点の到着順に対応した1, 2, 3の番号を振り、それぞれの飛行時間を t_1 , t_2 , t_3 とし、飛行時間に対応した運航コストを C_1 , C_2 , C_3 とする。一方、この3機の航空機は合流地点において前後間で最小限の時間間隔を確保する必要がある。図12はこの最小限の時間間隔を Δt_{min} と表している。3機の運航コストの総和の最小値を求めることは、3本の運航コスト関数に対して最小限の時間間隔を確保した飛行時間の組み合わせの中で、運航コストの総和が最小となる組み合わせを求めることと同じである。

運航コスト関数を求めるには、それを決定する機体の重量や諸元の情報が必要であるが、航空管制の実運用において管制官はそれらの情報を知ることはできないため、管制官は運航コスト関数を知ることはできず、図12のように複数のコスト関数を用いた最適化を行うことはできない。従って参考交通流における運航コストは、運用上は実現不可能であるが理論上は実現可能な運航コストの最小値を示し、今回提案する遅延予測方式がどれだけその運航コストの最小値に近づけたかの指標として扱う事が出来る。

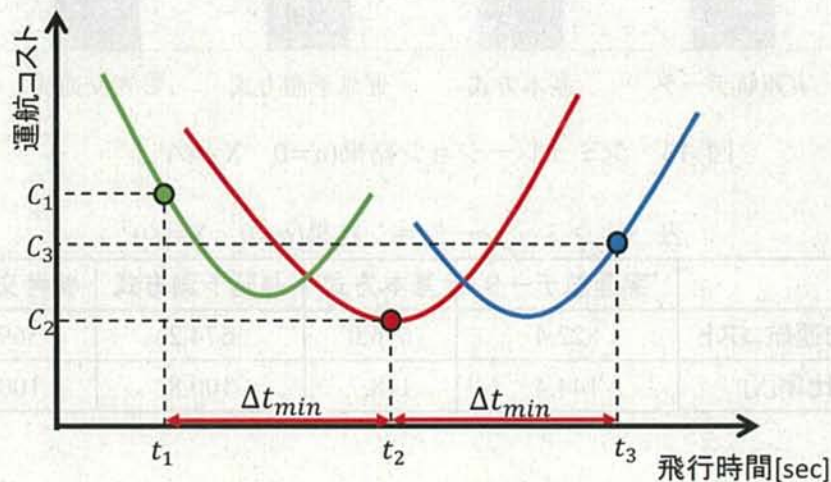


図12 参考交通流における飛行時間の最適化

4. 2 各スケジューリング方式の評価

実運航データの日付が 2012 年 5 月 7 日から 13 日, 同年 7 月 9 日から 15 日, 9 月 3 日から 9 日, 11 月 5 日から 11 日, 2013 年 1 月 7 日から 13 日, 同年 3 月 4 日から 10 日の計 42 日間の中で, 西方面から羽田空港へ着陸する交通流に適用した際の航空機 1 機あたりの平均運航コストと参考交通流における平均運航コストとの比率の結果を示す. シミュレーション解析をした総機体数は 17055 機である.

まず航空機の運航コストについて全航空機の時間係数 α を統一し, なおかつ 3.3 章で述べたスケジューリングする時刻の制約条件である X の値を $X=\infty$ とした場合のシミュレーション結果を図 13 から図 17, 表 5 から表 9 に示す. なお今回, α の値は $\alpha=0$, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 とした. 図 13 の左の縦軸は航空機 1 機あたりの平均運航コストを, 右の縦軸は参考交通流における平均運航コストを 100% とした時の比率を表している.

図と表から遅延予測方式は基本方式と比較して参考交通流における理論上実現可能な運航コストの最小値に大きく近づいていることが読み取れる.

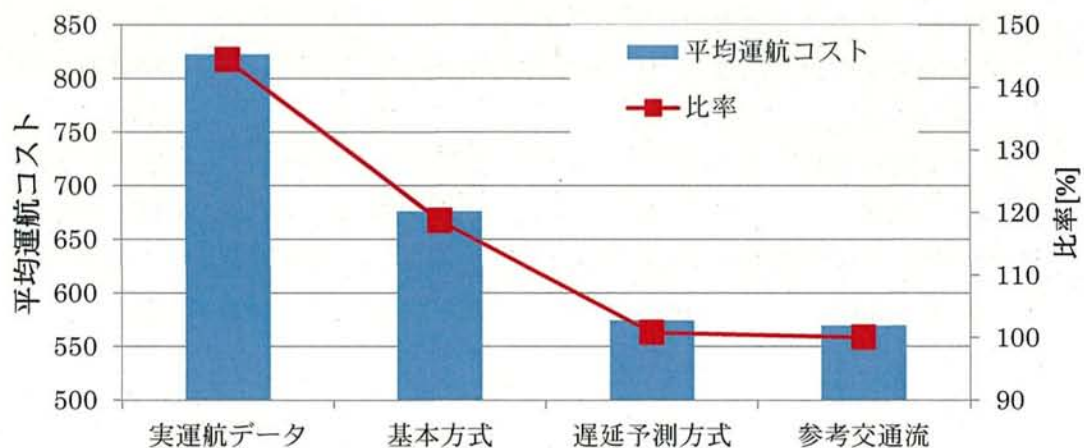


図 13 シミュレーション結果($\alpha=0$ $X=\infty$)

表 5 シミュレーション結果($\alpha=0$ $X=\infty$)

	実運航データ	基本方式	遅延予測方式	参考交通流
平均運航コスト	822.4	676.0	574.2	569.6
比率[%]	144.4	118.7	100.8	100.0

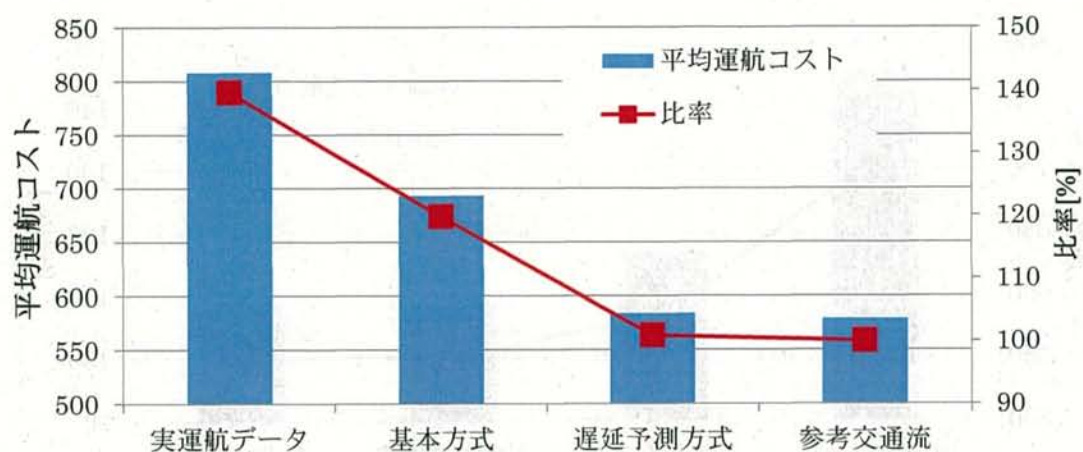


図 14 シミュレーション結果($\alpha=0.25$ $X=\infty$)

表 6 シミュレーション結果($\alpha=0.25$ $X=\infty$)

	実運航データ	基本方式	遅延予測方式	参考交通流
平均運航コスト	807.9	693.1	583.9	578.6
比率[%]	139.6	119.8	100.9	100.0

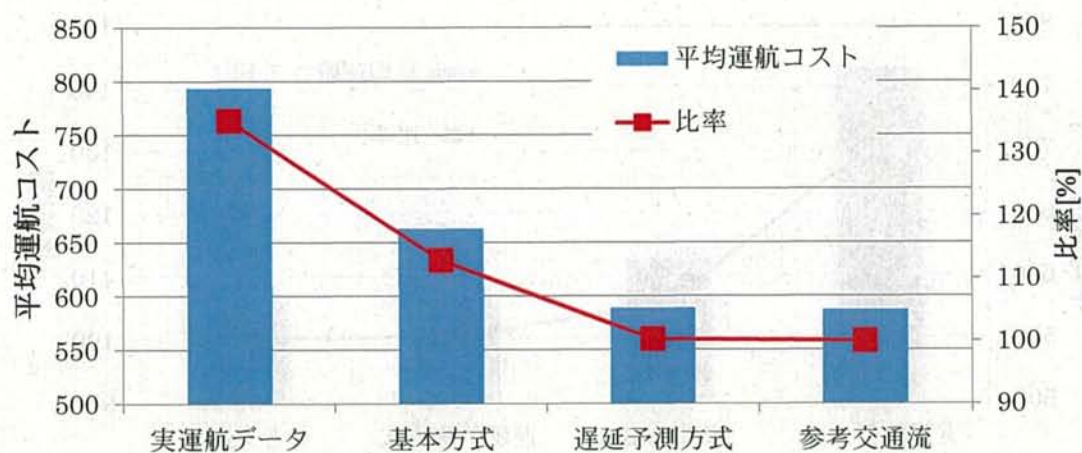


図 15 シミュレーション結果($\alpha=0.5$ $X=\infty$)

表 7 シミュレーション結果($\alpha=0.5$ $X=\infty$)

	実運航データ	基本方式	遅延予測方式	参考交通流
平均運航コスト	793.4	662.8	588.8	587.0
比率[%]	135.2	112.9	100.3	100.0

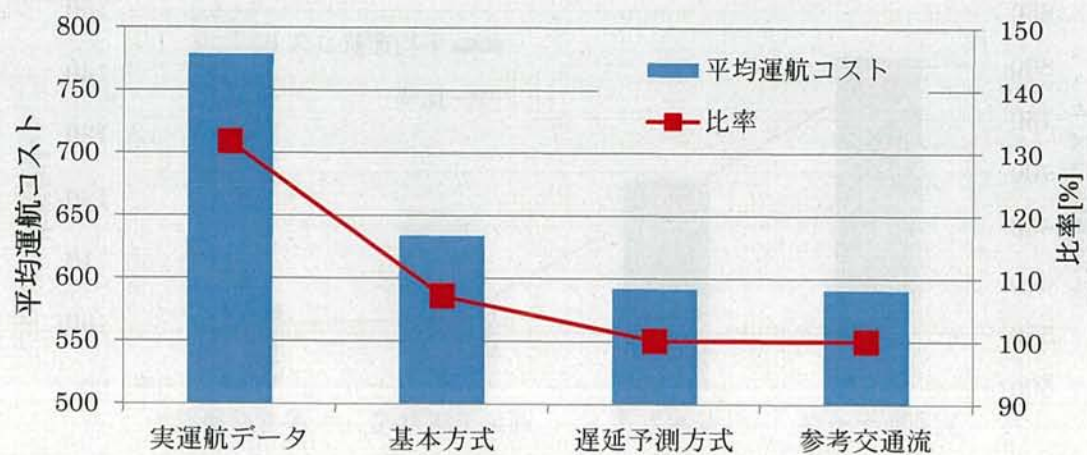


図 16 シミュレーション結果($\alpha=0.75$ $X=\infty$)

表 8 シミュレーション結果($\alpha=0.75$ $X=\infty$)

	実運航データ	基本方式	遅延予測方式	参考交通流
平均運航コスト	779.0	633.7	591.9	591.1
比率[%]	131.8	107.2	100.1	100.0

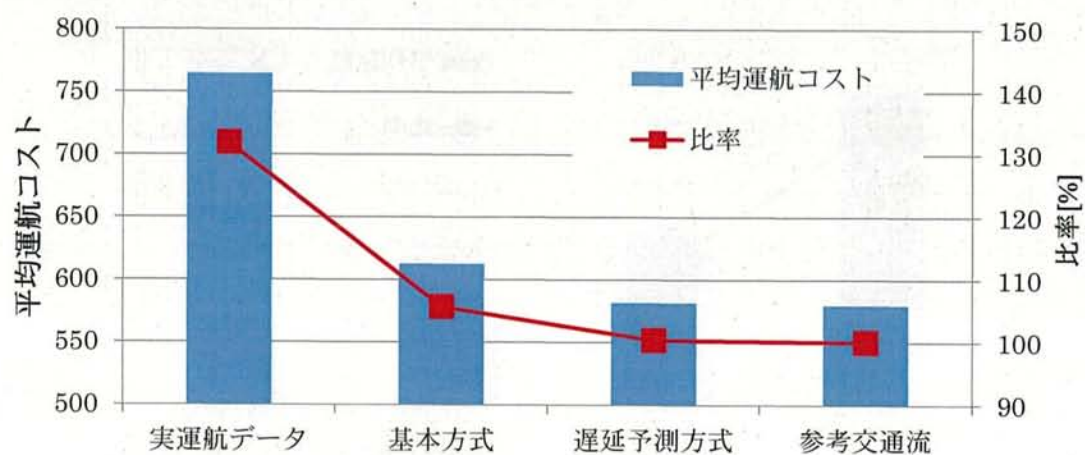


図 17 シミュレーション結果($\alpha=1.0$ $X=\infty$)

表 9 シミュレーション結果($\alpha=1.0$ $X=\infty$)

	実運航データ	基本方式	遅延予測方式	参考交通流
平均運航コスト	764.5	612.4	581.6	579.7
比率[%]	131.9	105.6	100.3	100.0

次に時間係数毎に基本方式と比較して遅延予測方式によって削減された運航コストと実運航データとの比率差をまとめた図と表を示す。図の左の縦軸は航空機 1 機あたりの平均の削減コストを、右の縦軸は基本方式と遅延予測方式の実運航データに対する比率差を表している。

また時間係数毎の遅延予測方式によって基本方式と比較して運航コストが減少、増加、変化しなかった機体の割合についての結果を表 11 に示す。この結果から遅延予測方式によって約 6~7 割の航空機の運航コストを削減できることがいえる。

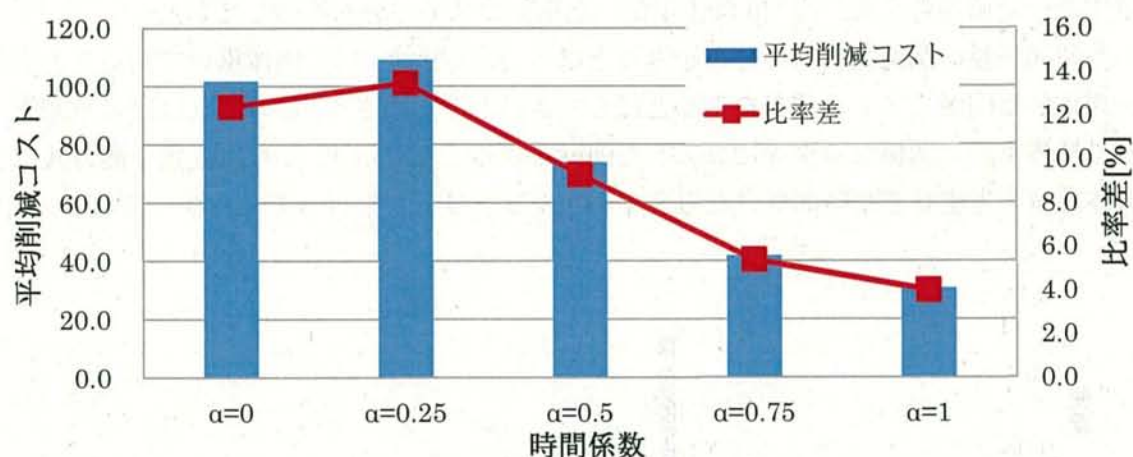


図 18 時間係数毎の平均削減コストと比率差

表 10 時間係数毎の平均削減コストと比率差

時間係数	$\alpha=0$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.75$	$\alpha=1$
平均削減コスト	101.8	109.2	74.0	41.9	30.8
比率差[%]	12.4	13.5	9.3	5.4	4.0

表 11 時間係数毎の遅延予測方式によるコスト増減の機体割合

時間係数	$\alpha=0$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.75$	$\alpha=1$
コストが減少	75.1 %	74.3 %	73.9 %	69.3 %	63.5 %
コストが増加	7.5 %	18.0 %	18.1 %	13.5 %	10.4 %
コストが同じ	17.4 %	7.7 %	8.0 %	17.2 %	26.1 %

次に時間係数毎に基本方式と比較して遅延予測方式によって削減された運航コストの分布を図に示す。図 19、図 21、図 23 は時間係数 $\alpha=0$, $X=\infty$ としたときの航空機 1 機毎の削減コスト分布を、図 20 は削減コストをその航空機のトン単位の機体重量で割った値の分布を示している。図 19 をみると、分布が広がっているが、これは機体重量を考慮していないためであり、機体重量が大きい航空機と小さい航空機のそれぞれの削減コストの値は大きく異なると考えられる。そこでこのような機体重量の大きさに関係なく削減コストの値を正規化するために、削減コストをその航空機のトン単位の機体重量で割った値を考える。図 20 は正規化した削減コストの分布を示している。

各時間係数の削減コストの分布をみるとばらつきが大きい、機体重量で割ることで正規化した削減コストの分布をみるとばらつきはとても小さく、このことは遅延予測方式は機体重量に関係なく平等にコストを削減できることを示す。これは遅延予測方式は機体重量を考慮せずに時間だけを考慮してスケジューリングを行っているからである。

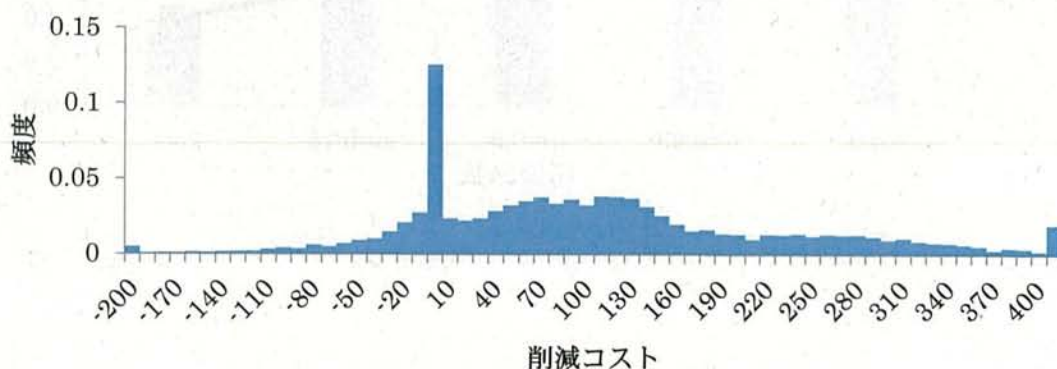


図 19 削減コストの分布 ($\alpha=0$ $X=\infty$)

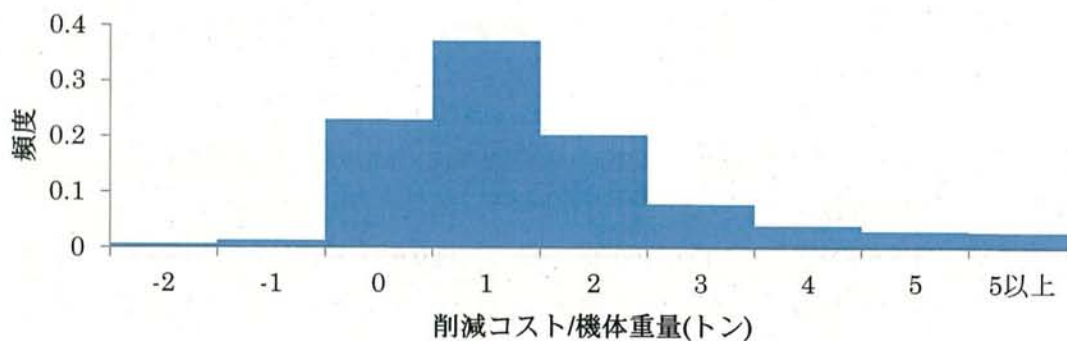


図 20 機体重量あたりの削減コスト ($\alpha=0$ $X=\infty$)

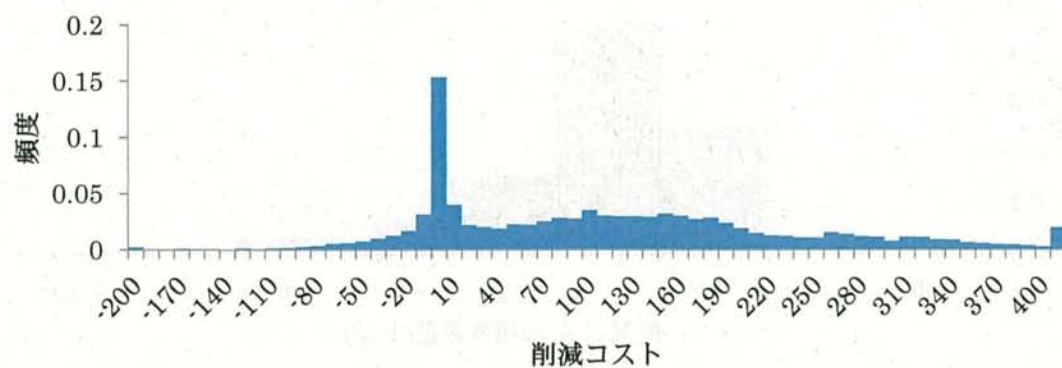


図 21 削減コストの分布 ($\alpha=0.25$ $X=\infty$)

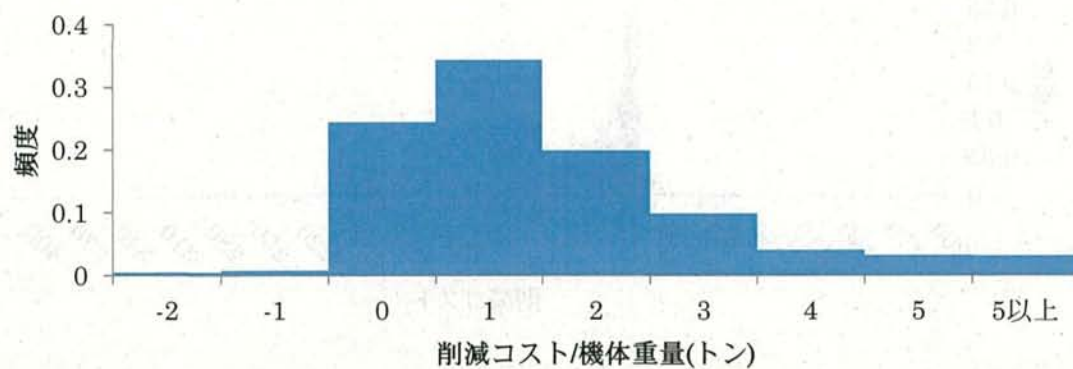


図 22 機体重量あたりの削減コスト ($\alpha=0.25$ $X=\infty$)

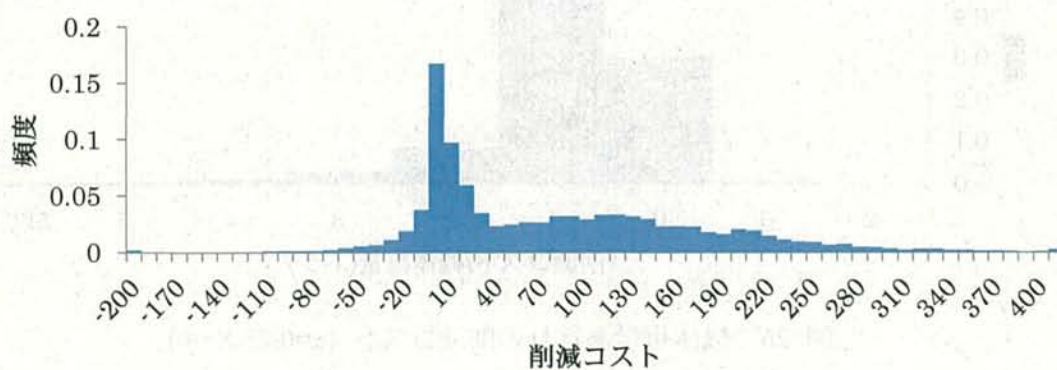


図 23 削減コストの分布 ($\alpha=0.5$ $X=\infty$)

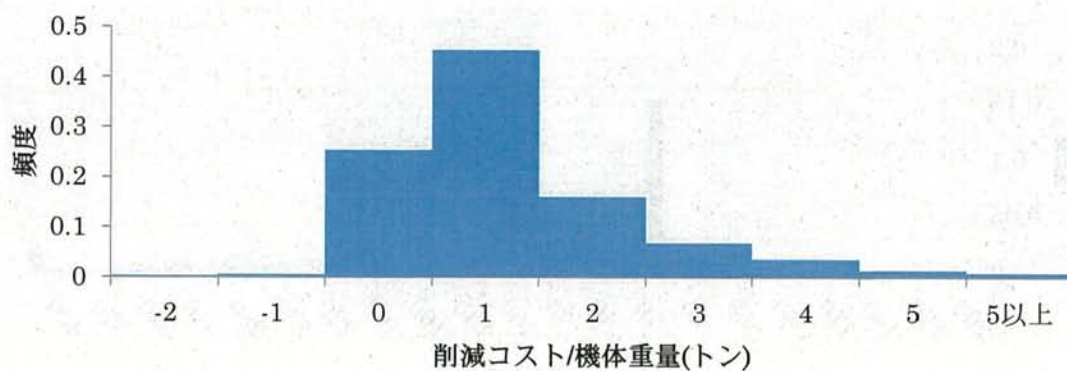


図 24 機体重量あたりの削減コスト ($\alpha=0.5, X=\infty$)

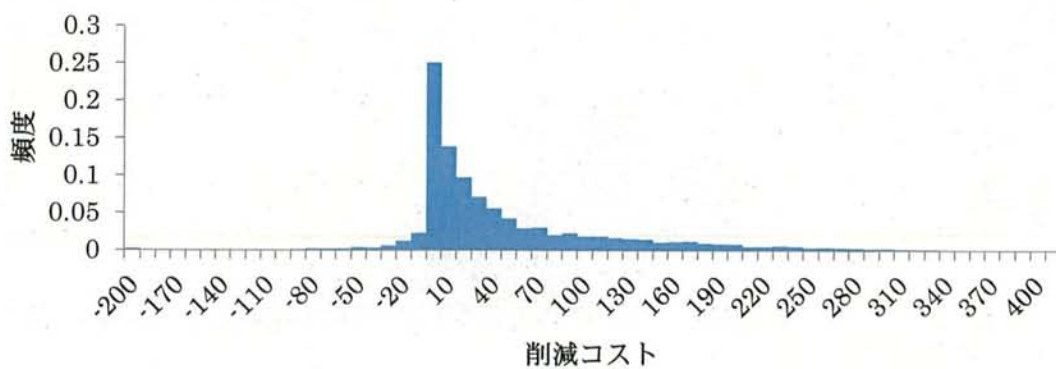


図 25 削減コストの分布 ($\alpha=0.75, X=\infty$)

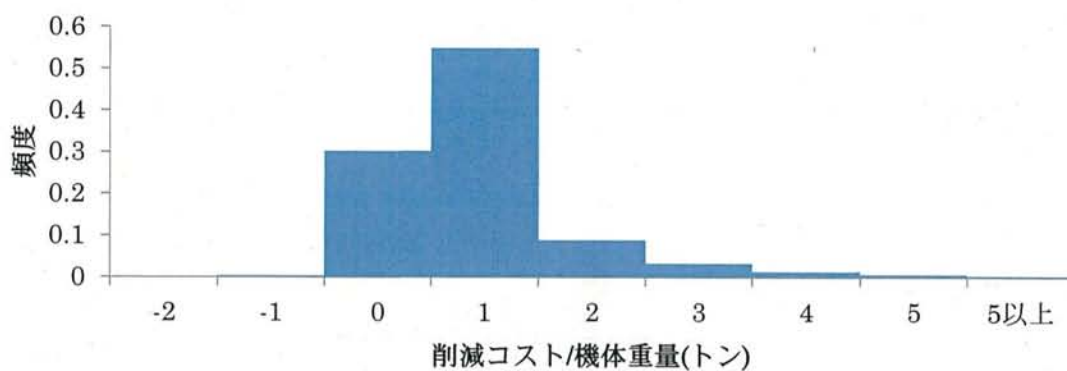


図 26 機体重量あたりの削減コスト ($\alpha=0.75, X=\infty$)

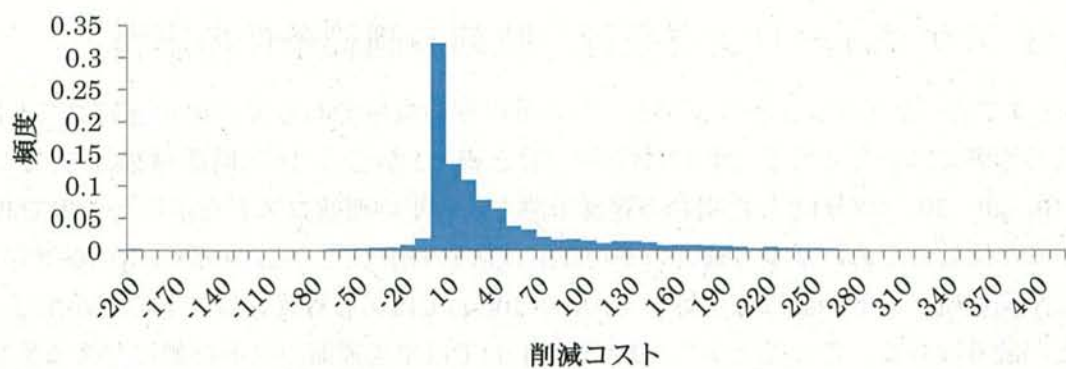


図 27 削減コストの分布 ($\alpha=1$ $X=\infty$)

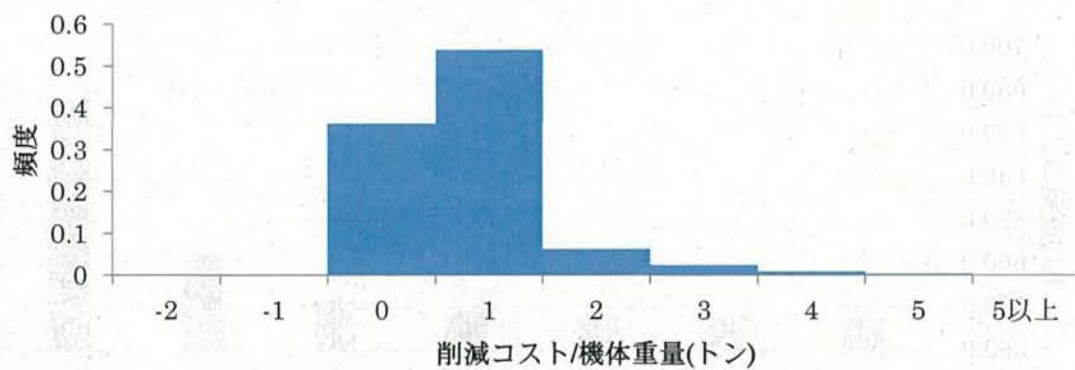


図 28 機体重量あたりの削減コスト ($\alpha=1$ $X=\infty$)

4. 3 スケジューリングを行う時刻の制約条件の影響

3.3 章で述べたスケジューリングを行う時刻の制約条件である X の値が運航コストに与える影響について考える. 図 31 から図 33 と表 12 から表 16 は時間係数毎に, $X=0, 5, 10, 20, 30, \infty$ (分)とした場合の遅延予測方式の平均運航コストを示したものである. また比較のために基本方式での平均運航コストも示した. これらから $X=10\sim\infty$ (分)では平均運航コストの値はほぼ等しく, $X=0\sim10$ (分)ではある程度のコストの差が生じることが読み取れる. このことから, $X=10\sim\infty$ (分)では平均運航コストの値に与える影響はほとんど小さく, $X=0\sim10$ (分)では影響が大きいことが言える. しかし, X がどの値でも基本方式と比較してコストを大きく削減することができる.

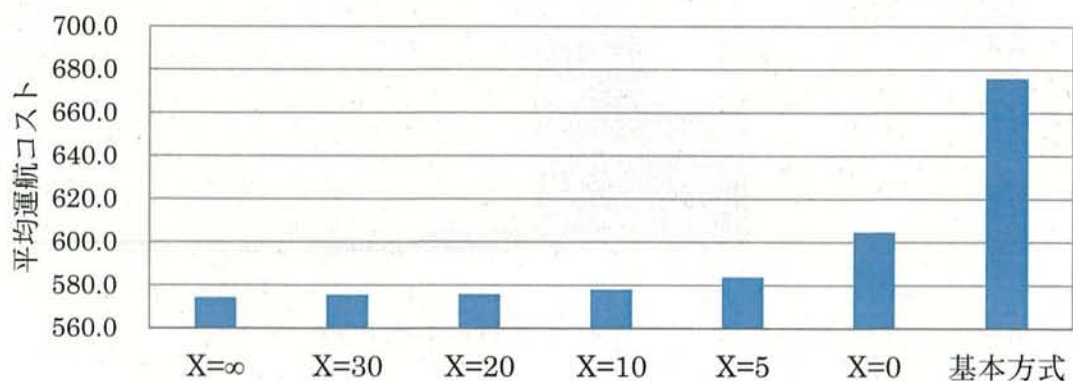


図 29 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0$)

表 12 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0$)

$\alpha=0$	$X=\infty$	$X=30$	$X=20$	$X=10$	$X=5$	$X=0$	基本方式
平均運航コスト	574.2	575.3	575.6	577.9	583.6	604.5	676.0

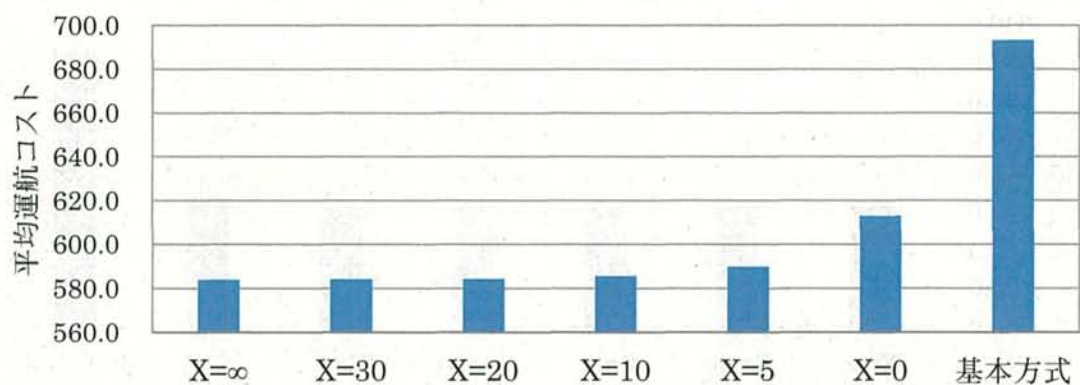


図 30 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0.25$)

表 13 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0.25$)

$\alpha=0.25$	$X=\infty$	$X=30$	$X=20$	$X=10$	$X=5$	$X=0$	基本方式
平均運航コスト	583.9	584.1	584.2	585.6	589.9	612.8	693.1

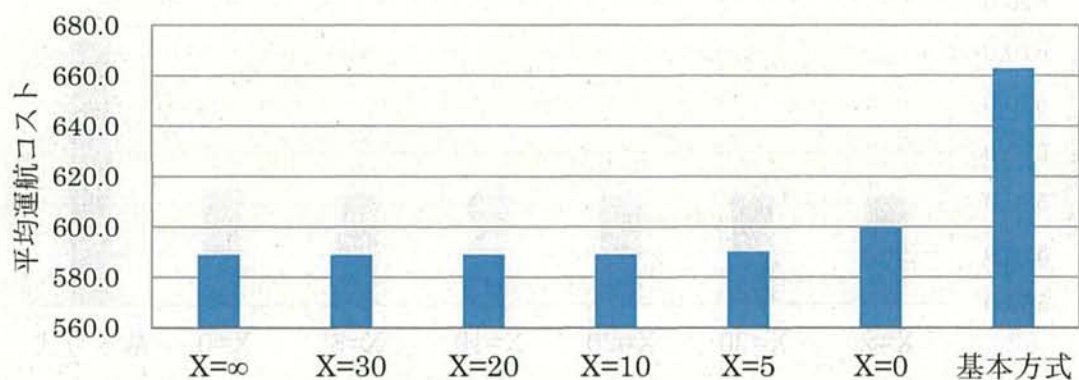


図 31 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0.5$)

表 14 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0.5$)

$\alpha=0.5$	$X=\infty$	$X=30$	$X=20$	$X=10$	$X=5$	$X=0$	基本方式
平均運航コスト	588.8	588.8	588.9	589.0	590.2	599.9	662.8

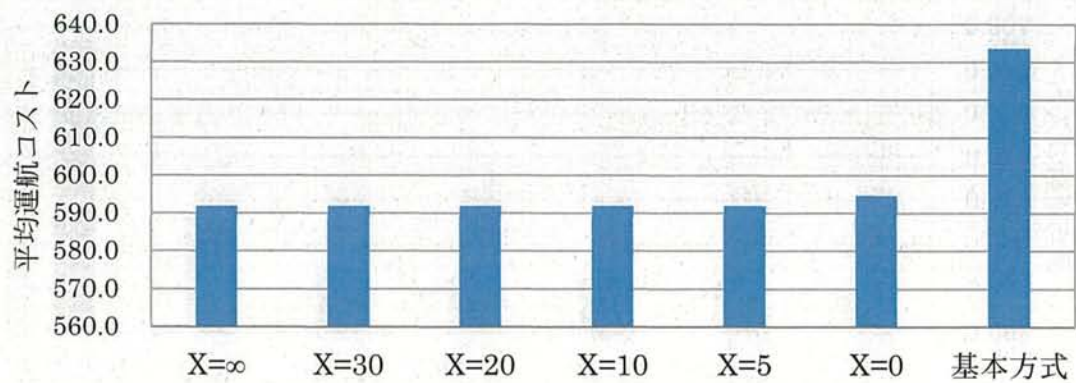


図 32 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0.75$)

表 15 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=0.75$)

$\alpha=0.75$	$X=\infty$	$X=30$	$X=20$	$X=10$	$X=5$	$X=0$	基本方式
平均運航コスト	591.9	591.9	591.9	591.9	591.9	594.7	633.7

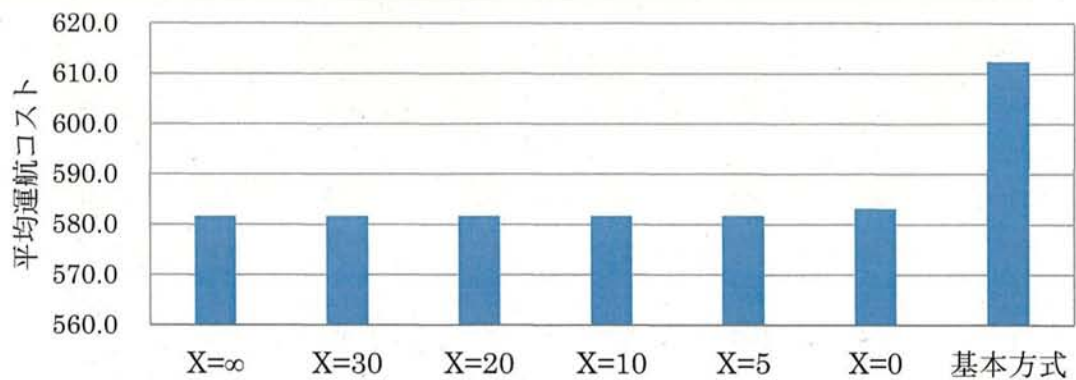


図 33 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=1.0$)

表 16 X の値毎の平均運航コスト($\alpha=1.0$)

$\alpha=1.0$	$X=\infty$	$X=30$	$X=20$	$X=10$	$X=5$	$X=0$	基本方式
平均運航コスト	581.6	581.6	581.6	581.6	581.7	583.1	612.4

また混雑交通流の先頭よりも前方の航空機群を再スケジュールリングする時に先頭の CDO 開始時刻からどれだけ前の CDO 開始時刻の航空機の再スケジュールリングを行うかどうかについて考える。図の様に混雑交通流の先頭の黒色の航空機が時間短縮した時に、赤色の航空機までの航空機群が時間短縮した際に、最後に再スケジュールリングした赤色の航空機と混雑交通流の先頭の黒色の航空機の CDO 開始時刻との差を Y(分)とする。

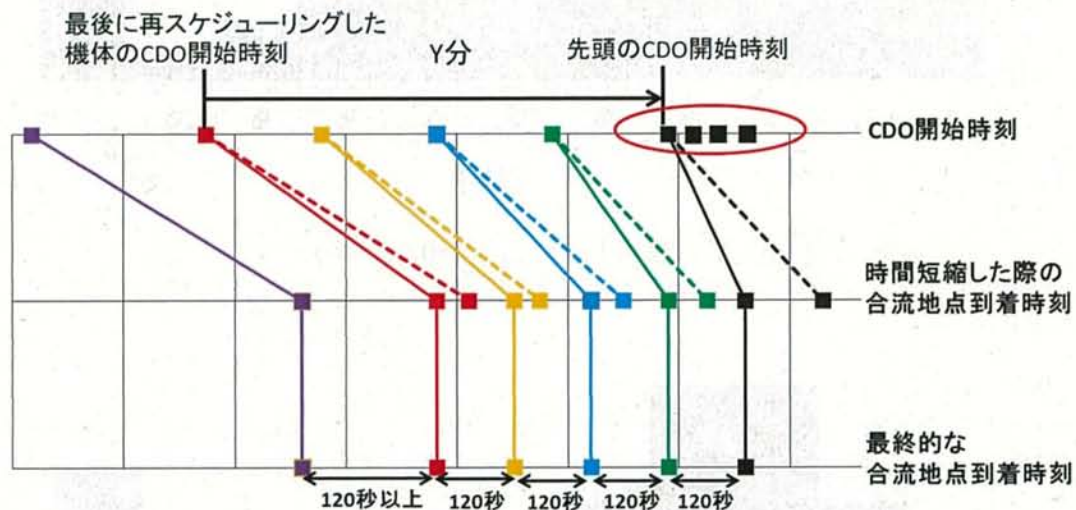


図 34 再スケジュールリング時の CDO 開始時刻の差

図 35 から図 39 は $X=\infty$ としたときの、時間係数毎の Y のヒストグラムである。Y の値が 10 分以上となった再スケジュールリングの回数の割合は全体の約 1~2 割であり、約 8~9 割の場合においては Y の値が 10 分以下となった。そのため実運用におけるスケジュールリングをする時刻の制約を考慮すると、管制官はある航空機のスケジュールリングを行う際にはその CDO 開始時刻の約 10 分前までに終わっていることが望ましいといえる。

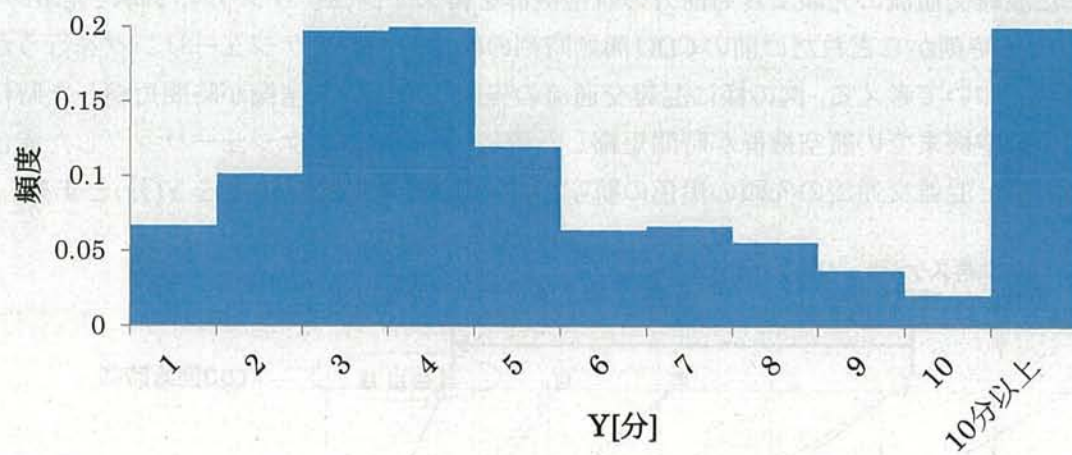


図 35 Y のヒストグラム ($\alpha=0$, $X=\infty$)

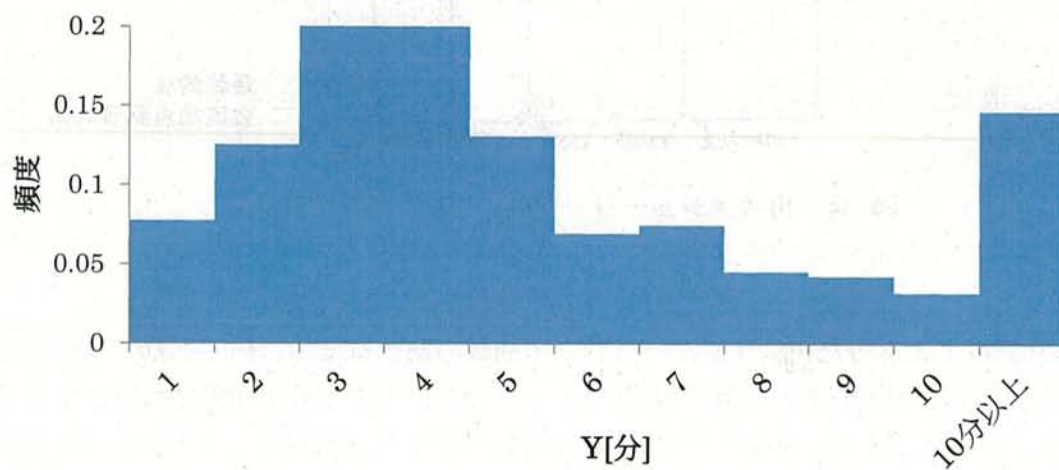


図 36 Y のヒストグラム ($\alpha=0.25$, $X=\infty$)

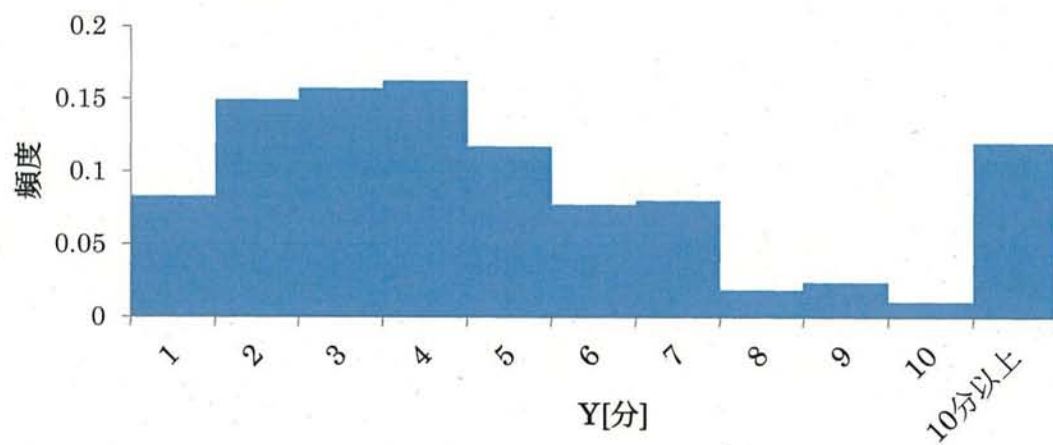


図 37 Y のヒストグラム ($\alpha=0.5$, $X=\infty$)

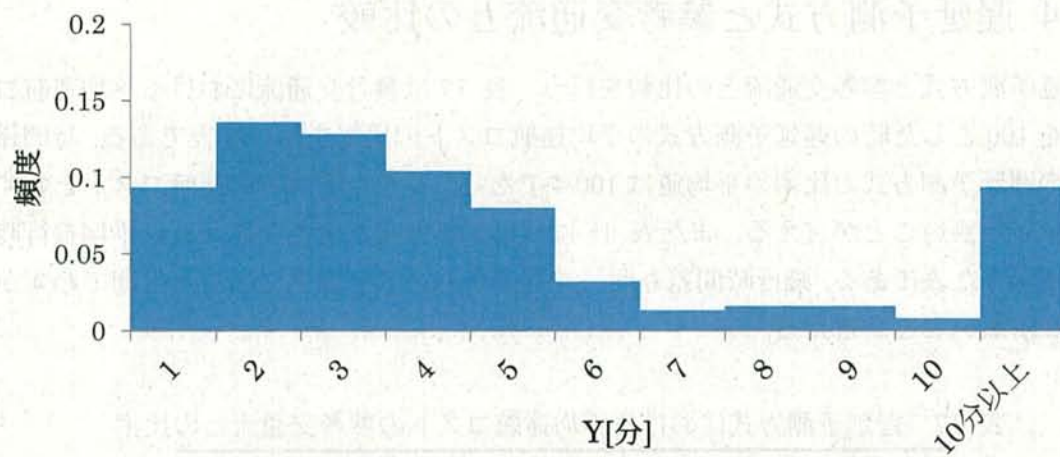


図 38 Y のヒストグラム ($\alpha=0.75$, $X=\infty$)

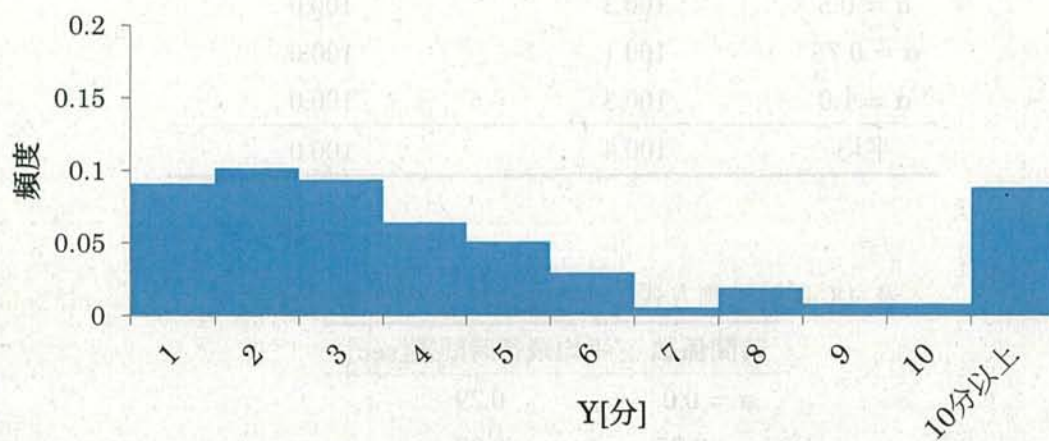


図 39 Y のヒストグラム ($\alpha=1.0$, $X=\infty$)

4. 4 遅延予測方式と参考交通流との比較

遅延予測方式と参考交通流との比較を行う。表 17 は参考交通流における平均運航コストを 100 とした時の遅延予測方式の平均運航コストの比率を示した表である。時間係数毎の遅延予測方式の比率の平均値は 100.4 であり、参考交通流での運航コストとわずかな差しか無いことが言える。また表 18 は遅延予測方式と参考交通流との平均飛行時間差を示した表である。飛行時間差も同じく遅延予測方式と参考交通流との間でわずかな差しか無いことが言える。

表 17 遅延予測方式における平均運航コストの参考交通流との比率

時間係数	遅延予測方式	参考交通流
$\alpha = 0.0$	100.8	100.0
$\alpha = 0.25$	100.9	100.0
$\alpha = 0.5$	100.3	100.0
$\alpha = 0.75$	100.1	100.0
$\alpha = 1.0$	100.3	100.0
平均	100.4	100.0

表 18 遅延予測方式と参考交通流との平均飛行時間差

時間係数	平均飛行時間差[sec]
$\alpha = 0.0$	0.29
$\alpha = 0.25$	0.27
$\alpha = 0.5$	0.26
$\alpha = 0.75$	0.33
$\alpha = 1.0$	0.28
平均	0.29

次に遅延予測方式と参考交通流とで、ほぼ同じ結果になる理由とわずかに差が生じる理由について考察する。図 41 はある 1 日のスケジューリング方式毎の遅延時間を表した図である。緑色は基本方式での、赤色は遅延予測方式での、青色は参考交通流での遅延時間を表しており、縦軸は遅延時間、横軸は航空機の合流地点の到着時刻を秒単位で表している。また遅延時間は各航空機の飛行時間から最小コスト飛行時間を差し引いた値である。図を見ると遅延予測方式は参考交通流とほぼ重なっています。また両方式とも基本方式よりも同様に遅延時間が小さいことから飛行時間の短縮による運航コストの低減の原理は同じであると言え、このことが遅延予測方式と参考交通流の結果がほぼ同じになる理由と考えられる。しかし、赤色の線が見える部分のように遅延予測方式と参考交通流で一部異なる部分があり、遅延時間に差異がある。

遅延予測方式と参考交通流とで結果にわずかな差が生じるのは、小型機と大型機が連続する交通流の場合に生じるためであると言える。図 40 は図 41 のある時間帯を拡大した図である。この図の連続した 3 機の航空機に着目する。連続した 3 機の航空機の内、1 機目は重量が 58 トンの小型機、2 機目は重量が 65 トンの小型機、3 機目は重量が 155 トンの大型機である。参考交通流において、この小型の 2 機は遅延予測方式よりも更に時間短縮している。そのため運航コストが増加するが、この 2 機が前方に詰めてくれたことで後方に間隔の余裕が生まれ、後続の大型機の遅延は遅延予測方式よりも小さくなっていて、交通流全体として運航コストは小さくなっている。

このように小型機と大型機が連続する交通流において、参考交通流では小型機の運航コストが遅延予測方式よりも増加することになるが遅延予測方式の時よりも更に時間短縮することで後続の大型機の運航コストを小さくし、交通流全体の運航コストを小さくするようなスケジューリングを行っている。一方、遅延予測方式では運航コスト関数の情報から時間短縮を行っているのではなく、予測される平均の遅延時間から短縮する時間を決めているので、小型機や大型機に関係なく平等に時間短縮を行う。そのため、小型機と大型機が連続する交通流において、遅延予測方式と参考交通流とで結果に差が生じるため、全体としてわずかながらも差が生じる。

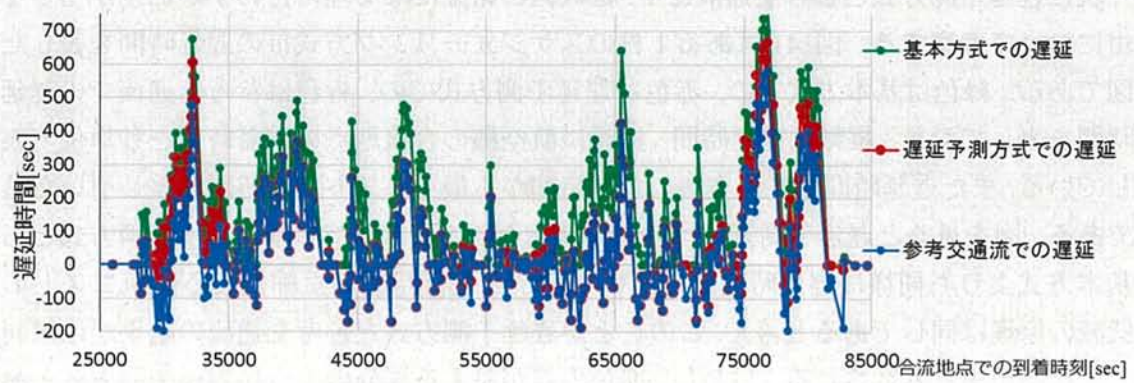


図 41 ある 1 日のスケジューリング方式毎の遅延時間

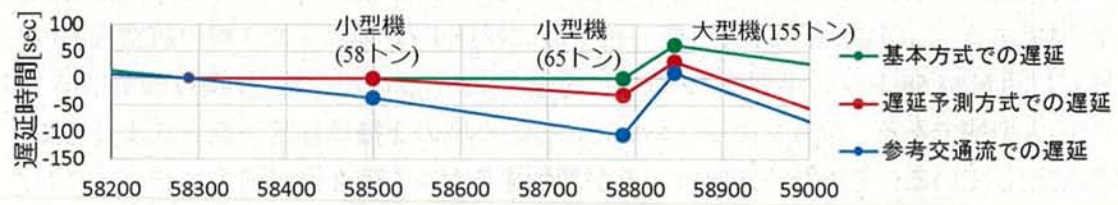


図 40 遅延予測方式と参考交通流とで差異が生じる例

第5章 結論

本研究では、実際の交通流管理で実現可能なスケジューリング方式である遅延予測方式を提案し、その方式によってほぼ最適な交通流を実現できることを実運航データを用いたシミュレーションによって明らかにした。

従来の研究では、航空機の運航コスト関数を用いた交通流の運航コストを最小化するスケジューリング方式が提案されていたが、実際の交通流管理では運航コスト関数を用いることはできない。しかし今回、実際の交通流管理において管制官がパイロットとの通信により得られる到着時刻の情報のみを用いて遅延を予測し、それを利用してスケジューリングを行う方式を提案した。そのため、今回提案した方式は実際の交通流管理においても実現することができる。

また今回提案した遅延予測方式による到着管理は先行研究で提案された基本方式と比較し、約 6~7 割の航空機の運航コストを減少させ、1 機あたり約 72 の運航コストつまり約 72kg 相当の燃料を削減できる。また実運航データの平均運航コストに対する比率を基本方式と比較して更に約 9%下げた。更に運用上は実現不可能であるが理論上実現可能な最適な交通流における運航コストを 100%とすると遅延予測方式のコストは約 100.4%となり、最適な交通流をほぼ実現できたといえる。

基本方式は混雑時において、一度遅延が発生すると運航コストが一方向的に増加してしまう問題があった。しかし、遅延予測方式は混雑が始まる直前の航空機も含めて混雑交通流の航空機を短縮した飛行時間で飛行させることで、運航コストの増加を抑える事が可能であるといえる。このように時間短縮による運航コストの低減は有効であり、また運航コスト関数に関する情報が無くても、パイロットとの通信で得られる情報を用いてほぼ最適な交通流を実現できることを明らかにした。

参考文献

- [1] NextGen JPDO, "Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System, Version 3.2," JPDO, Washington, D.C., 2011.
- [2] ESAR Joint Undertaking, "Roadmap for Sustainable Air Traffic Management, European ATM Master Plan, edition 2," October 2012.
- [3] Japan Civil Aviation Bureau, "Long-term Vision for the Future Air Traffic Systems," 2010.
- [4] Erzberger, H., and Nedell, W., "Design of automated system for management of arrival traffic," NASA TM-102201, 1989.
- [5] Erzberger, H., "Design Principles and Algorithms for Automated Air Traffic Management," Knowledge-based Functions in Aerospace Systems, AGARD Lecture Series 200, Nov. 1995.
- [6] Neuman, F. and Erzberger, H., "Analysis of Delay Reducing and Fuel Saving Sequencing and Spacing Algorithms for Arrival Traffic," NASA/TM-103880, 1991.
- [7] Sadovsky, A. V., Swenson, H. N., Haskell, W. B. and Rakas, J., "Optimal time advance in terminal area arrivals: Throughput vs. fuel savings," IEEE/ AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, Seattle, WA, Oct. 2011.
- [8] Sadovsky, A. and Fabien, B., "Separation- Compliant Time Advance in Terminal Area Arrivals: Tradeoff between Makespan and Fuel Burn," AIAA GNC Conference, 2013.
- [9] Wu, M.G. and Swenson, H.N., "Enhancing the Traffic Management Advisor's Schedule by Time Advance," AIAA GNC Conference, Kissimmee, FL, Jan. 5-9, 2015.
- [10] Mutuel, L.H., Neri, P. and Paricaud, E., "Initial 4D Trajectory Management Concept Evaluation," 10th USA/Europe Air Traffic Management R&D, Chicago, Jun. 10-13, 2013
- [11] Takeichi, N., "Nominal Flight Time Optimization for Arrival Time Scheduling through Estimation/Resolution of Delay Accumulation," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 77, April 2017, Pages 433–443.
- [12] Robertson, B., "Fuel Conservation Strategies, Cost Index Explained," Boeing Aero Quarterly, QTR 02-07, pp.26-29, 2007.
- [13] CARATS Open Data, provided by Japan Civil Aviation Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Press Release on CARATS Open Data, Feb, 2015.
- [14] 気象庁,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>
- [15] Nuic, A., "User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.13," Eurocontrol Experimental Center, May 2015.
- [16] Zhou, J., "Optimization of Arrival and Departure Routes in Terminal Maneuvering Area" ICRAT 2014

[17] 虎谷大地,上野誠也,樋口丈浩, "空港周辺空域における上昇機のための最適な回避軌道に関する研究" 航空宇宙技術,vol.14,pp.105-112,2015.

[18] D.Toratani, S. Ueno,T.Higuchi, "Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence for Receding Horizon Guidance in Terminal Area", SICE Journal of CMSI, Vol. 8, No. 2, pp.144-153, 2015.

謝辞

本研究を進めるにあたり武市昇准教授に研究方針や内容について様々な助言をいただきました。お忙しい中、何度もご指導いただき深く御礼申し上げます。また研究室の皆様には研究だけでなく日々の生活においてもお世話になりました。最後にこれまで、自分を支えてくださった先生方、家族や友人に深く御礼申し上げます。